Journal of Water and Soil
Homepage: https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 37, No. 5, Dec.-Jan., 2023, p. 769-785

Projected Precipitation Extremes in Lake Urmia Basin under Climate Change

N. Ebrahimi[1], A. Zarrin[2]*, A. Mofidi[3], A.A. Dadashi-Roudbari[4]
1, 2, 3 and 4- M.Sc, Associate Professors and Postdoctoral Research Associate of Climatology, Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: zarrin@um.ac.ir)

Received: 10-04-2023 Revised: 08-07-2023 Accepted: 18-07-2023 Available Online: 24-07-2023	**How to cite this article:** Ebrahimi, N., Zarrin, A., Mofidi, A., & Dadashi-Roudbari, A.A. (2023). Projected precipitation extremes in Lake Urmia basin under climate change. *Journal of Water and Soil, 37*(5), 769-785. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2023.81891.1270

Introduction

Climate change has led to changes in the frequency, intensity, duration, and spatial distribution of climate extremes. During the last decade (2011-2020), the average global temperature was 0.1 ± 1.1 ºC higher than in the preindustrial era. Iran and especially the Urmia Lake basin is one of the most vulnerable areas to climate change. Urmia lake basin has received the special attention of policymakers and planners since it is the location of Lake Urmia, and it also holds nearly 7% of Iran's water resources. A huge program of dam construction and irrigation networks has been started in this basin in the northwest of Iran since the late 1960s. Despite the increasing attention to Lake Urmia since 1995, the water level of this lake has decreased. During the drought of 1990-2001, Lake Urmia experienced a decrease in its level without any recovery and is decreasing at an alarming rate. Therefore, it is necessary to project the future climate of the Urmia Lake basin and especially extreme precipitation based on the latest climate change models.

Materials and Methods

The CMIP6 models were used to investigate the future projection of extreme precipitation in the Lake Urmia basin. Considering the horizontal resolution, availability of daily data, and climate sensitivity, we selected five models including GFDL-ESM4, IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0, and UKESM1-0-LL. The horizontal resolution of all five models is 0.5º. The 25-year historical period (1990-2014) and the 25-year projection period for the near future (2026-2050) were chosen to analyze the extreme precipitation in the Urmia Lake Basin. The future projection was considered under three shared socioeconomic pathways (SSPs) scenarios. These scenarios include SSP1-2.6, SSP3-7.0, and SSP5-8.5 scenarios. Mean bias error (MBE) and Normalized Root Mean Square Error (NRMSE) were computed to evaluate the individual models and the multi-model ensemble generated by Bayesian Model Average (BMA) method. To assess extreme precipitation, we used four indices including the Number of heavy precipitation days (R10mm), the number of very heavy precipitation days (R20mm), the Maximum 1-day total precipitation (Rx1day), and the Simple Daily Intensity Index (SDII).

Results and Discussion

The performance of five CMIP6 individual models and the multi-model ensemble in the Lake Urmia basin during the period of 1990 to 2014 was evaluated against eight ground stations. The investigation of the annual precipitation showed that this variable is underestimated in CMIP6 models in the basin averaged. The maximum and minimum bias values model was seen in Saqez station by -9.64 mm for the MRI-ESM2-0 and -0.43 mm for the UKESM1-0-LL, respectively. The highest average MBE in the Urmia Lake basin was respectively obtained

https://doi.org/10.22067/jsw.2023.81891.1270

for GFDL-ESM4, IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0, and UKESM1-0-LL models. Among the examined models, MPI-ESM1-2-HR has shown the highest efficiency among the examined individual models.

Variations in the number of heavy precipitation days during the historical period (1990-2014) have distinguished three main areas for the Lake Urmia basin. The main hotspot of heavy precipitations in the Urmia Lake basin is located in the southwest of Kurdistan province with a long-term average of 25.4 days. The next hotspots are the northwest and the northeast of the basin. In the historical period (1990-2014), the precipitation intensity index Rx1day experienced considerable variability. Based on CMIP6-MME, the value of the Rx1day index in the Urmia Lake basin is estimated between a minimum of 16.3 mm and a maximum of 63.3 mm. The maximum variation of this index is seen in the southern areas of the basin, especially on the border with Iraq.

Conclusion

Evaluation of individual CMIP6 models showed that these models underestimated precipitation in the Lake Urmia basin during the historical period (1990-2014). The CMIP6-MME has significantly improved precipitation estimation. The results of the investigation of days with heavy and very heavy precipitation showed that the two indices R10mm and R20mm are increasing in most areas of the Lake Urmia basin by the middle of the 21st century. Trend analysis showed that the days with heavy and very heavy precipitation will increase under different SSP scenarios in most areas of the Lake Urmia basin, especially in the northern and western regions. Also, days with heavy and very heavy precipitation will have a greater contribution than normal precipitation days in the future. It is expected that the intensity of precipitation will increase in the coming decades in the Lake Urmia basin, and this increase is more for the western and northern regions than for other regions of the basin. This result may potentially increase the flood risk in Lake Urmia.

Keywords: Climate change, CMIP6-MME, Extreme precipitation, Urmia Lake basin

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۵، آذر-دی ۱۴۰۲، ص. ۷۸۵-۷۶۹

پیش‌نگری بارش‌های فرین در حوضه دریاچه ارومیه تحت شرایط تغییر اقلیم

نسرین ابراهیمی[۱]- آذر زرین[۲]*- عباس مفیدی[۳]- عباسعلی داداشی رودباری[٤]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۲۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۷

چکیده

سطح آب و وسعت دریاچه ارومیه در طی سال‌های اخیر نسبت به میانگین بلند مدت، کاهش چشمگیری داشته و ادامه حیات آن را با تهدید جدی مواجه کرده است. لذا بررسی دقیق وضعیت بارش حوضه و پیش‌نگری آن در آینده به‌عنوان یکی از مهم‌ترین متغیرهای اقلیمی اثرگذار در برنامه‌ریزی‌های آینده ضروری است. این پژوهش با هدف بررسی وضعیت بارش‌های فرین حوضه دریاچه ارومیه در آینده نزدیک انجام شده است. برای این منظور از داده‌های بارش پنج مدل از پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6) تحت سه سناریو SSP1-2.6، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 طی دوره تاریخی (۲۰۱۴–۱۹۹۰) و آینده نزدیک (۲۰۵۰–۲۰۲۶) با تفکیک افقی ۰/۵ درجه قوسی استفاده شده است. برای کاهش خطای مدل‌های منفرد، یک مدل همادی (CMIP6-MME) بر اساس روش میانگین‌گیری بیزین (BMA) از مدل‌های منفرد تولید شد. درستی مدل‌های منفرد CMIP6 و مدل CMIP6-MME با دو سنجه میانگین اریبی خطا (MBE) و مجذور میانگین مربعات خطای بهنجار شده (NRMSE) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد مدل‌های منفرد در برآورد بارش در حوضه دریاچه ارومیه کم‌برآوردی دارند. مدل همادی تولید شده مقدار دو سنجه MBE و NRMSE را در سطح حوضه به مقدار قابل توجهی کاهش داد که بر این اساس نسبت به مدل‌های منفرد از کارایی بالاتری برخوردار است. یافته‌ها بیانگر آن است که، حوضه دریاچه ارومیه روزهای همراه با بارش سنگین و خیلی سنگین بیش‌تری را در آینده نزدیک تجربه خواهد نمود. شدت بارش روزانه در بخش‌های بزرگی از حوضه، بخصوص در مناطق غربی و شمالی، روند افزایشی خواهد داشت. بطور کلی ریسک ناشی از بارش‌های سیل‌آسا در حوضه دریاچه ارومیه در دوره آینده نزدیک بسیار محتمل است که لازم است برنامه‌های اقدام اقلیمی و پیش‌گیرانه همانند مدیریت ریسک اقلیمی در اولویت برنامه‌ریزی‌های مرتبط با این منطقه باشد.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، حوضه دریاچه ارومیه، فرین‌های بارشی، مدل‌های CMIP6

مقدمه

تغییر اقلیم منجر به تغییر در فراوانی، شدت، مدت و گستره مکانی فرین‌های اقلیمی شده است (IPCC, 2013). طی دهه گذشته (۲۰۲۰–۲۰۱۱) میانگین دمای جهانی ۰/۱ ± ۱/۱ درجه سلسیوس نسبت به دوره قبل از انقلاب صنعتی بالاتر بوده است (WMO, 2020). افزایش دمای جهانی باعث افزایش تبخیر از سطح و محتوای آب موجود در جو شده است. در پاسخ به گرمایش جهانی، انتظار می‌رود که بارش‌های فرین در سراسر جهان افزایش یابند (IPCC, 2021). تغییرات شدت بارش به نسبت بالایی به مقدار کل رطوبتی که جو می‌تواند در خود نگه دارد وابسته است. بنابراین انتظار می‌رود با توجه به رابطه کلاسیوس–کلاپیرون (CC) شدت بارش با آهنگ حدوداً ۶ تا ۷ درصد به ازای هر درجه از گرمایش افزایش یابد (Trenberth, 2011). در چنین شرایطی با افزایش فرین‌های بارشی چرخه آب جهانی و منطقه‌ای نیز تغییر خواهد کرد (Liu *et al.*, 2015). به‌عنوان یکی از گسترده‌ترین انواع مخاطرات طبیعی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک، فرین‌های

۱، ۲، ۳ و ۴- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشیاران و پژوهشگر پسادکتری اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: zarrin@um.ac.ir)

https://doi.org/10.22067/jsw.2023.81891.1270

بارشی تأثیر زیادی بر زندگی مردم، زیرساخت‌های شهری، کشاورزی و محیطزیست دارند (IPCC, 2014). بنابراین پیش‌نگری تغییرات بارش‌های فرین و تأثیر آن بر جامعه، تحت گرمایش جهانی بسیار مهم و ضروری است.

تغییر اقلیم دیگر موضوعی مربوط به آینده نیست، بلکه در حال حاضر بر بسیاری از مناطق جهان تأثیر گذاشته است. ایران و به‌ویژه حوضه دریاچه ارومیه به دلیل ظرفیت سازگاری محدود یکی از آسیب پذیرترین مناطق از تغییر اقلیم هستند. حوضه دریاچه ارومیه از آنجا که نزدیک به ۷ درصد از منابع آب ایران را در اختیار دارد مورد توجه ویژه سیاست گذاران و برنامه‌ریزان قرار گرفته است. برنامه عظیمی از شبکه های سد سازی و آبیاری در این حوضه مهم در شمال‌غرب ایران از اواخر دهه ۱۹۶۰ میلادی (نیمه دوم دهه ۴۰ خورشیدی) آغاز شده است. با وجود توجه روزافزون نسبت به دریاچه ارومیه از سال ۱۹۹۵ (۱۳۷۳ه.خ)، سطح آب این دریاچه کاهش یافته است. بنابراین، برنامه-های احیای دریاچه ارومیه از سال ۲۰۰۰ در دستور کار قرار گرفته است. دریاچه ارومیه از زمان خشکسالی ۲۰۰۱-۱۹۹۰ بدون هیچ بهبودی کاهش سطح خود را تجربه کرده و با سرعت نگران کننده‌ای در حال کاهش است (Hasemi, 2011). حتی با احیای مجدد دریاچه در سال های گذشته، طی سال‌های اخیر مجدد سطح خود را از دست داده است. لذا ضرورت دارد وضعیت اقلیم آینده حوضه دریاچه ارومیه و بخصوص بارش‌های فرین بر اساس جدیدترین مدل‌های تغییر اقلیم مورد مطالعه دقیق قرار گیرد تا در گام بعدی برای تدوین برنامه اقدام اقلیمی برای این حوضه استراتژیک در کشور اطلاعات لازم فراهم گردد. بر این اساس مسئله اصلی تحقیق حاضر شناسایی وضعیت بارش‌های فرین به عنوان یک ریسک جدی ناشی از تغییر اقلیم در حوضه دریاچه ارومیه به عنوان یکی از مهم‌ترین مراکز جمعیتی، کشاورزی و صنعتی ایران است.

ارزیابی پیامدهای تغییر اقلیم در آینده نیازمند فراهم نمودن داده‌های اقلیمی با تفکیک افقی بالا است تا امکان بررسی شرایط پیش رو میسر گردد. مدل‌های گردش کلی (GCMs) برای درک اقلیم جهانی و ارزیابی متغیرهای اقلیمی یک ابزار کلیدی هستند (IPCC, 2013). با این حال، GCMها به دلیل فرمول‌بندی ریاضی، تفکیک افقی، شرایط آغازین و واداشت‌ها عدم قطعیت و اریبی زیادی مواجه هستند که کاربرد آن‌ها را در مقیاس منطقه‌ای و محلی محدود می‌کند. برای رفع محدودیت‌های گفته شده از GCMها، تولید چند مدلی همادی و تصحیح اریبی که در برخی منابع از آن‌ها با عنوان مقیاس‌کاهی آماری نیز نام‌برده می‌شود (Coulibaly *et al.*, 2005)، راهکاری مناسب برای بررسی پیامدهای تغییر اقلیم در مقیاس محلی و منطقه‌ای است.

بارش‌های فرین یکی از پیامدهای آشکار تغییر اقلیم است. بطوری که در سال‌های اخیر باعث خسارات قابل توجهی در مناطق مختلف جهان شده است. همین امر باعث شده است تا این جنبه از تغییر اقلیم به‌شکل جدی مورد بررسی پژوهشگران مختلف قرار گیرد. مطالعات بی شماری در سطح جهانی (Seneviratne & Hauser, 2020; Thackeray *et al.*, 2022)، منطقه‌ای (Deng *et al.*, 2021; Ryan *et al.*, 2022) و حتی محلی (Nie & Sun, 2022) روند افزایشی در خصوصیات بارش‌های فرین را گزارش کرده‌اند. بخش قابل توجهی از مطالعاتی که فرین‌های بارشی را مورد بررسی قرار داده‌اند پیش‌نگری آن را با استفاده از برونداد مدل‌های CMIP3، CMIP5 و CMIP6 انجام داده‌اند. این مطالعات عموماً از دو منظر به بررسی فرین‌های بارشی پرداخته‌اند. دسته اول به درستی سنجی مدل‌های CMIP برای برآورد فرین‌های بارشی پرداخته‌اند (Li *et al.*, 2022; Faye & Akinsanola, 2022; Pimonsree *et al.*, 2023). نتایج این پژوهش‌ها نشان داد که مدل‌های CMIP6 از کارایی بالایی برای برآورد بارش و فرین‌های بارشی در اقلیم‌های مختلف برخوردار هستند. دسته دوم نیز صرفاً تغییرات و بی هنجاری های بارش و فرین‌های بارشی را در چشم انداز آینده مد نظر قرار داده‌اند (Meresa *et al.*, 2022; Xu *et al.*, 2022). نتایج این مطالعات تغییر الگوی بارش‌ها و فرین‌های بارشی را همانطور که در گزارش ششم (AR6) هیات بین دولتی تغییر اقلیم (IPCC, 2021) آمده است در سطح جهانی تایید کرده‌اند.

ایران در سال‌های اخیر با افزایش بی‌سابقه دما، افزایش خشکسالی، افزایش بارش‌های سیل‌آسا و امواج گرمایی مواجهه بوده است. از جمله این مخاطرات می‌توان به سیل فروردین ۱۳۹۹، خشکسالی بی‌سابقه ۱۴۰۰، بارش‌های سیل‌آسای تابستان ۱۴۰۱، امواج گرمایی بی سابقه تابستان در چند سال اخیر و بسیاری دیگر از این موارد اشاره کرد که همگی نشان دهنده افزایش قابل توجه فرین‌های اقلیمی در ایران هستند. همانند مطالعات جهانی، فرین‌های بارشی در ایران نیز در پژوهش‌های مختلفی مورد توجه قرار گرفته است. این مطالعات را بسته به نوع داده و روش، می‌توان در دسته‌های مختلفی قرار داد. تعدادی از مطالعات از داده‌های ایستگاهی برای بررسی فرین‌های بارشی استفاده نموده‌اند. نتایج آن‌ها حاکی از آن است که، شدت بارش‌ها در ایران طی دهه‌های گذشته روند افزایشی داشته است (Alavinia & Zarei, 2021; Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2022a). دسته دیگری از مطالعات، فرین‌های بارشی را با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و بازتحلیل مورد بررسی قرار دادند. این مطالعات سعی نمودند تغییرات زمانی-مکانی بارش‌های فرین در ایران را بررسی نمایند (Malaekeh *et al.*, 2022; Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2022b). گروه دیگری از مطالعات چشم انداز آینده فرین‌های بارشی در ایران را با استفاده از مدل‌های CMIP5 (Katiraie-Boroujerdy *et al.*, 2019) و CMIP6 (Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2021; Yazdandoost *et al.*, 2021; Zarrin *et al.*, 2022a; Chamanehfar *et al.*, 2022; Modaresi & Araghi, 2023) مورد

توجه قرار دادند. نتایج این مطالعات نشان داد که این مدل‌ها کارایی بالایی در برآورد بارش و فرین‌های بارشی در ایران دارند. همچنین یافته‌های پیشین نشان داد که شدت بارش و روزهای همراه با بارش سنگین و خیلی سنگین در آینده روند افزایشی خواهد داشت.

پژوهش‌های انجام شده در سطح جهانی و ایران حاکی از آن است که تغییر اقلیم یک مسئله جدی است و اثرات و پیامدهای این پدیده، بیش از همه در فرین‌های اقلیمی نمود می یابد. با این حال، به رغم مطالعات متعددی که در ایران بر روی فرین‌های اقلیمی به انجام رسیده است، اما به طور مشخص کمتر مطالعه‌ای بر روی حوضه دریاچه ارومیه انجام شده است. لذا این مطالعه از چندین جنبه حائز اهمیت خواهد بود. نخست این که، کارایی مدل‌های پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم موسوم به CMIP6 در حوضه دریاچه ارومیه مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. علاوه بر آن، نتایج بکارگیری مدل‌ها به شکل منفرد و همادی در سطح حوضه مورد بررسی قرار خواهد گرفت و چشم انداز آینده بارش‌های فرین در حوضه دریاچه ارومیه بررسی خواهد شد. نتایج حاصل از این تحقیق برای برنامه‌ریزی‌های آتی این حوضه مفید واقع خواهد باشد. چنانکه، پیش‌نگری تغییرات بارش‌های فرین به عنوان یکی از جنبه‌های اثرگذار در شرایط فعلی دریاچه ارومیه، توسط سیاستگذاران و مدیران پروژه احیای دریاچه ارومیه مطرح گردیده است. بدین ترتیب، دستاوردهای این تحقیق برای برنامه ریزی و انجام اقدامات فوری می‌تواند مد نظر مدیران و سیاستگذاران قرار گیرد.

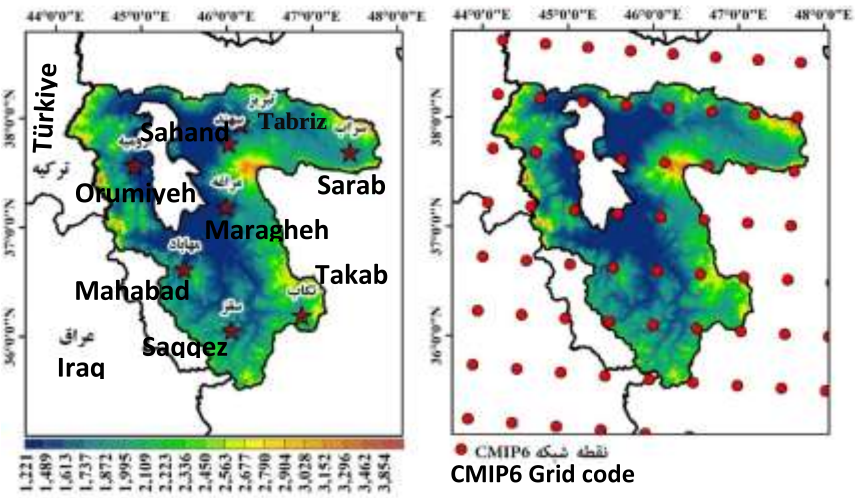
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این مطالعه بر روی شمال‌غرب ایران با تمرکز بر حوضه دریاچه ارومیه انجام شده است (شکل ۱). حوضه دریاچه ارومیه یکی از بزرگترین مراکز جمعیتی شمال‌غرب ایران است. اقلیم نیمه خشک و کوهستانی با ارتفاع بین ۱۲۲۱ متر تا ۳۸۵۴ متر از ویژگی های جغرافیایی این حوضه است. عمده فعالیت‌های این حوضه بر کشاورزی متمرکز است که با خشک شدن دریاچه ارومیه طی سال‌های گذشته مشکلات بسیاری را از نظر زیست محیطی، مدیریت منابع آب و کشاورزی به‌همراه داشته است. دوازده رودخانه آجی چای، آذرشهر چای، صوفی چای، زرینه رود، سیمینه رود، مهاباد چای، گدار چای، بار اندوز چای، شهر چای، نازلو چای، زولا چای و سینیخ چای در این حوضه به دریاچه ارومیه می‌ریزند.

داده‌های مشاهداتی

داده‌های هشت ایستگاه هواشناسی همدید تبریز، ارومیه، سهند، سراب، مراغه، مهاباد، تکاب و سقز که موقعیت آن‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است برای درستی سنجی متغیر بارش مدل‌های CMIP6 طی دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۰) مورد استفاده قرار گرفته است. مبنای انتخاب این هشت ایستگاه بکارگیری حداکثری ایستگاه‌ها بر اساس پراکنش جغرافیایی مناسب آن‌ها در تمامی مناطق حوضه و طول دوره آماری با کمترین داده مفقود می‌باشد.



شکل ۱- موقعیت نقطه شبکه‌های ۰/۵ درجه قوسی CMIP6 (سمت راست) و مقایسه آن با ایستگاه‌های هواشناسی همدید در حوضه دریاچه ارومیه (سمت چپ)

توپوگرافی حوضه با رنگ بر روی نقشه‌ها نشان داده است.

Figure 1- CMIP6 grid points (right side) and its comparison with synoptic stations in Lake Urmia basin (left side)

The topography of the basin is shown in color on the figures

جدول ۱- مشخصات مدل‌های CMIP6 (مدل‌های منتخب به شکل برجسته مشخص شده‌اند)

Table 1- Characteristics of CMIP6 models (selected models have been highlighted)

Num شماره	Model مدل	HR	ECS	Num شماره	Model مدل	HR	ECS
1	INM-CM5-0	100	1.9	11	ACCESS-ESM1-5	250	3.9
2	CAMS-CSM1-0	100	2.3	12	CNRM-CM6-1-HR	50	4.3
3	MIROC6	250	2.6	13	KACE-1-0-G	250	4.5
4	GFDL-ESM4	100	2.6	14	IPSL-CM6A-LR	250	4.6
5	BCC-CSM2-MR	100	3.0	15	CESM2-WACCM	250	4.8
6	FGOALS-F3-L	100	3.0	16	CNRM-CM6-1	250	4.8
7	MPI-ESM1-2-HR	100	3.0	17	CESM2	100	5.2
8	EC-Earth3-CC	100	3.1	18	UKESM1-0-LL	250	5.3
9	AWI-CM-1-1-MR	100	3.2	19	HadGEM3-GC31-LL	250	5.6
10	MRI-ESM2-0	100	3.2	20	CanESM5	500	5.6
حساسیت اقلیم ترازمند (ECS) بر حسب درجه سلسیوس، تفکیک افقی (HR) بر حسب کیلومتر							

مدل‌های CMIP6

برای بررسی چشم انداز آینده وضعیت بارش‌های فرین در حوضه دریاچه ارومیه از مدل‌های CMIP6 استفاده شد. با در نظر گرفتن شروط تفکیک افقی مناسب، در دسترس بودن داده‌های روزانه و حساسیت اقلیم ترازمند (ECS) (Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2023) پنج مدل شامل GFDL-ESM4، IPSL-CM6A-LR، MPI-ESM1-2-HR، MRI-ESM2-0 و UKESM1-0-LL انتخاب شدند (جدول ۱).

سپس با استفاده از روش درون یابی دو خطی (Bilinear Interpolation) تفکیک افقی مدل‌ها ۰/۵ درجه قوسی شده و اریبی آن‌ها با روش تصحیح مرتبه متوالی (SEC) تصحیح شد (Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2021). یک دوره تاریخی ۲۵ ساله (۲۰۱۴-۱۹۹۰) و یک دوره پیش‌نگری ۲۵ ساله برای آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۶) برای تحلیل بارش و فرین‌های بارشی حوضه دریاچه ارومیه استفاده شد. دوره پیش‌نگری آینده تحت سه سناریو خطسیر مشترک اجتماعی-اقتصادی (SSP) در نظر گرفته شد (Eyring *et al*., 2016). این سناریوها عبارتند از: سناریوی توسعه پایدار (SSP1-2.6)، سناریوی رقابت‌های منطقه‌ای: بدبینانه (SSP3-7.0) و سناریوی توسعه سوخت‌های فسیلی: خیلی بدبینانه (SSP5-8.5).

مدل میانگین‌گیری بیزین (BMA)

مدل میانگین‌گیری بیزین (Bayesian Model Average (BMA)) به‌عنوان یک روش آماری پیشنهادی برای واسنجی مدل های اقلیمی در پیش‌بینی/نگری‌های همادی استفاده می‌شود. وزن BMA برابر با احتمال پسین (Posterior Probability) مدل‌های تولید کننده پیش‌بینی/نگری است که سهم نسبی هر مدل را منعکس می‌کند (Raftery *et al*., 2005). خروجی BMA یک تابع توزیع احتمال (PDF) است. وزن BMA نشان دهنده مشارکت نسبی مدل‌ها است. در این مطالعه کلیه فرآیندهای مربوط به BMA برای داده‌های روزانه پنج مدل برای دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۱) و دوره پیش‌نگری (۲۰۵۰-۲۰۲۶) تحت سه سناریو SSP1-2.6، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 انجام و یک مدل همادی از مدل‌های منتخب پنجگانه برای بررسی فرین‌های بارشی حوضه دریاچه ارومیه تولید شده است. مدل همادی تولید شده اگرچه خطای مدل‌های منفرد را تا سطح قابل توجهی کاهش می‌دهد اما این به معنای یقینی بودن نتایج به‌دست آمده نیست.

درستی سنجی مدل‌های منتخب CMIP6

درستی برونداد بارش پنج مدل CMIP6 و مدل همادی تولید شده با روش BMA در حوضه دریاچه ارومیه طی دوره آماری ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ بررسی شد. از داده‌های هشت ایستگاه هواشناسی همدید (شکل ۱) و دو سنجه آماری شامل ریشه میانگین مربعات خطای بهنجار شده (NRMSE) و میانگین اریبی خطا (MBE) جهت درستی سنجی استفاده شد.

سنجه MBE جهت بررسی اختلاف بین میانگین مقادیر مشاهده‌ای (ایستگاه‌های همدید) و مدل استفاده شده و بیانگر انحراف از میانگین می‌باشد. این مقدار می‌تواند مثبت و منفی باشد که نشان دهنده کم براوردی و بیش‌برآوردی در مقایسه با مقادیر میانگین داده‌های مشاهداتی است. سنجه ریشه دوم میانگین مربعات خطای بهنجار شده یکی از سنجه‌هایی است که معمولاً از آن برای بررسی کارایی پیش‌بینی یک مدل در برابر داده‌های مشاهداتی استفاده می‌شود (Sorooshian *et al*., 1993).

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)}{N} \quad (۱)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{N}} ;NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \quad (۲)$$

در روابط فوق، P_i مقدار برآورد شـــده بارش CMIP6، O_i مقدار مشاهده‌ای بارش بر اساس داده‌های ایستگاهی، $\bar{O}$ میانگین مشاهداتی و n تعداد کل داده‌ها است.

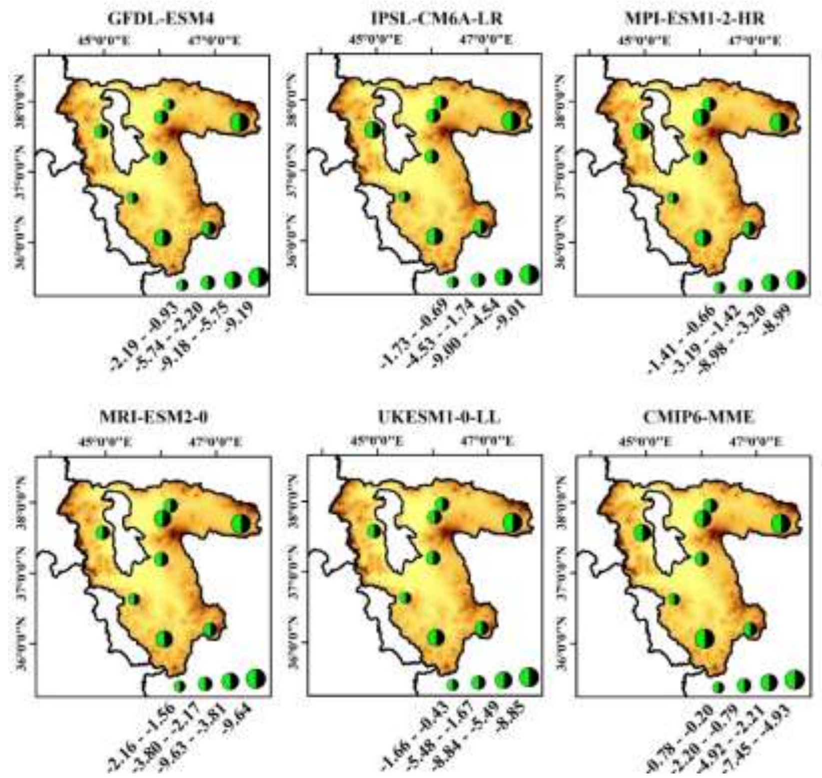
فرین‌های بارشی

فرین‌های بارشی را می‌توان با روش‌های مختلفی محاسبه و بررسی کرد. کارگروه تخصصی در زمینه تغییر اقلیم و شاخص‌های فرین (ETCCDI) که توسط کمیسیون مشترک سازمان جهانی هواشناسی (WMO) و برنامه تحقیقات اقلیم جهانی (WCRP) سازماندهی شده، شاخص‌های فرین مختلفی را توسعه داده است (Zhang *et al*., 2011). این شاخص ها که بر اساس داده‌های روزانه هستند، معمولاً فرین‌ها را به‌شکل سالانه توصیف می‌کنند. از شاخص‌های ETCCDI به طور گسترده استفاده شده و کاربرد آن در مطالعات تغییر اقلیم در سطح جهانی تایید شده است (Alexander & Arblaster, 2017). در این پژوهش نیز از شاخص‌های ETCCDI استفاده شده است. شاخص‌های مورد استفاده شده برای فرین‌های بارشی حوضه دریاچه ارومیه، شامل آن دسته از شاخص‌هایی می‌شود که شدت بارش را بررسی می‌کنند. بر این اساس چهار شاخص فرین بارش شامل روزهای همراه با بارش سنگین (R10mm)، روزهای همراه با بارش خیلی سنگین (R20mm)، بیشینه بارش یک روزه (Rx1day) و شدت بارش روزانه (SDII) بررسی شده است.

نتایج و بحث

درستی سنجی بارش مدل‌های منفرد CMIP6 و مدل همادی تولید شده

نتایج بررسی مدل‌های CMIP6 نشان داد که این مدل‌ها در کل حوضه برای بارش سالانه کم‌برآوردی دارند. بیشینه مقدار اریبی با ۹/۶۴– میلی‌متر برای مدل MRI-ESM2-0 و کمینه آن با مقدار ۰/۴۳– میلی‌متر برای مدل UKESM1-0-LL در ایستگاه سقز دیده شد. متوسط سنجه MBE در حوضه دریاچه ارومیه براساس شکل ۲ به‌ترتیب برای مدل‌های GFDL-ESM4، IPSL-CM6A-LR، MPI-ESM1-2-HR، MRI-ESM2-0 و UKESM1-0-LL از بیشترین به کمترین به‌دست آمده است. در بین مدل‌های مورد بررسی MPI-ESM1-2-HR بالاترین کارایی را بین مدل‌های منفرد مورد بررسی نشان داده است. اریبی سیستماتیک بارش در حوضه دریاچه توسط مدل‌های CMIP6 ممکن است به عوامل متعددی همانند ارائه ضعیف همرفت کومولوس، برهمکنش بیوسفر-جو، رطوبت خاک و فرآیندهای سطح زمین مرتبط باشد (Deng *et al*., 2021; Faye & Akinsanola, 2022; Li *et al*., 2022).

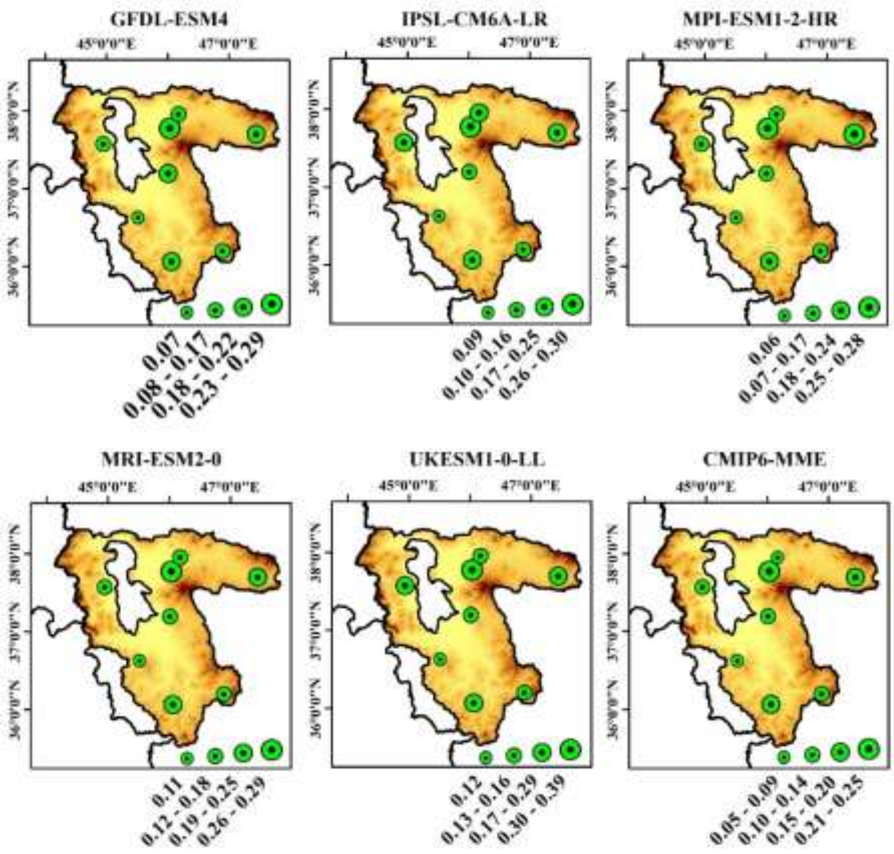


شکل ۲- میانگین اریبی بارش مدل‌های منفرد CMIP6 و مدل همادی تولید شده با روش BMA در حوضه دریاچه ارومیه

Figure 2- Average precipitation bias of individual CMIP6 models and multi-model ensemble model generated by BMA method in Lake Urmia basin

درستی‌سنجی مدل همادی تولید شده با روش BMA نشان داد که این مدل نسبت به مدل‌های منفرد مقدار اریبی را به شکل قابل توجهی در حوضه دریاچه ارومیه کاهش داده است. همانطور که در شکل ۲ هم مشاهده می‌شود مقدار اریبی مدل CMIP6-MME حداقل ۰/۲۰- تا حداکثر ۴/۹۳- میلی‌متر در تغییر است است. افزایش کارایی مدل همادی نسبت به مدل‌های منفرد پیش‌تر توسط زرین و داداشی رودباری (Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2021) در ایران مورد تأیید قرار گرفته است.

سنجه NRMSE نیز نتایج مشابهی را با MBE نشان داده است. بطوری‌که در هر هشت ایستگاه نماینده مورد بررسی، سراب بالاترین مقدار NRMSE را برای پنج مدل مورد بررسی نشان داده است. مقدار سنجه NRMSE بین حداقل ۰/۰۶ در ایستگاه مهاباد برای مدل MPI-ESM1-2-HR تا حداکثر ۰/۳۹ در ایستگاه سهند برای مدل UKESM1-0-LL در تغییر است. مقدار NRMSE نیز برای مدل همادی تولید شده همانند سنجه MBE کاهش داشته است که در شکل ۳ نتایج آن دیده می‌شود. نتایج به‌دست آمده بر اهمیت بکارگیری مدل همادی نسبت به مدل‌های منفرد اشاره دارد که نتایج به‌دست آمده توسط زرین و داداشی رودباری (Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2021) و زرین و همکاران (Zarrin *et al*., 2022a) را تأیید می‌کند. لذا کاربست مدل‌های منفرد در پژوهش‌های مرتبط با تغییر اقلیم می‌تواند خطا را به مقدار قابل توجهی افزایش دهد و بکارگیری مدل همادی راهکاری مناسب برای کاهش خطای مدل‌ها است. از سوی دیگر بررسی سنجه‌های آماری نشان داد که کارایی مدل‌ها بسته به منطقه جغرافیایی متفاوت است. لذا مدل واحدی وجود ندارد که کاراترین مدل برای نمایش ویژگی‌های کامل یک منطقه جغرافیایی یا حتی یک حوضه آبخیز همانند حوضه دریاچه ارومیه باشد.



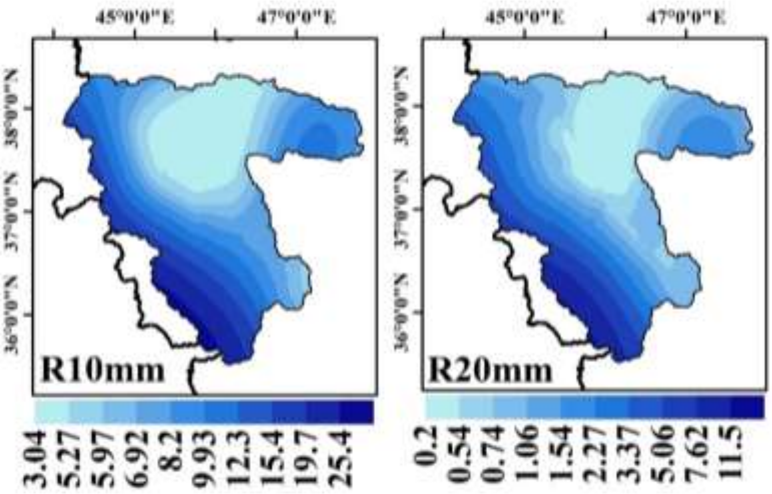
شکل ۳- مجذور میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) بارش مدل‌های منفرد CMIP6 و مدل همادی تولید شده با روش BMA در حوضه دریاچه ارومیه

Figure 3- Normalized Root Mean Square Error (NRMSE) of precipitation of CMIP6 individual models and multi-model ensemble model generated by BMA method in Lake Urmia basin

تغییرات روزهای همراه بارش سنگین طی دوره تاریخی (۲۰۱۴–۱۹۹۰) سه پهنه اصلی را برای حوضه دریاچه ارومیه آشکار ساخته است. کانون اصلی بارش‌های سنگین حوضه دریاچه ارومیه با متوسط بلند مدت ۲۵/۴ روز در جنوب غربی حوضه در استان کردستان قرار دارد. پس از آن مرز شمال‌غربی و گوشه شمال‌شرقی در اطراف سبلان، بیشینه روزهای همراه با بارش سنگین را تجربه می‌نمایند. با این حال در بخش‌های بزرگی از حوضه متوسط بلندمدت روزهای بارش سنگین کمتر از ۱۰ روز در سال است. حداقل روزهای همراه با بارش سنگین با ۳ روز در سال در مناطق شمالی حوضه مشاهده می‌شود. بررسی بارش های خیلی سنگین نشان می‌دهد که در کل حوضه، فراوانی وقوع بارش خیلی سنگین بین ۰/۲ تا ۱۱/۵ روز در سال متغیر است (شکل ۴). حدود ۹۰ درصد از مساحت کل حوضه، بارش خیلی سنگین کمتر از ۵ روز در سال را تجربه می‌کند. همچنین، مناطق مرکزی، شمالی و شرقی حوضه که در حدود نیمی از وسعت حوضه دریاچه ارومیه را شامل می‌گردند، غالباً فراوانی بارش خیلی سنگین کمتر از ۱ روز در سال را تجربه می کنند. کانون اصلی بارش‌های خیلی سنگین نیز همانند بارش‌های سنگین در مناطق غربی و جنوب‌غربی حوضه است. در تحلیل سازوکار وقوع بارش‌های سنگین شمال غرب کشور یافته‌های برخی تحقیقات اخیر بیانگر آن است که عمیق شدن ناوه ترازهای میانی همراه با انتقال رطوبت از عرض‌های جنوبی نقش قابل توجهی در رخداد این بارش ها دارد. در فصل بهار وقوع این دسته از بارش‌ها با شکل‌گیری مکرر سامانه بندال در ترازهای میانی وردسپهر بر روی خاورمیانه همراه است (Khorshiddoust *et al.*, 2016).

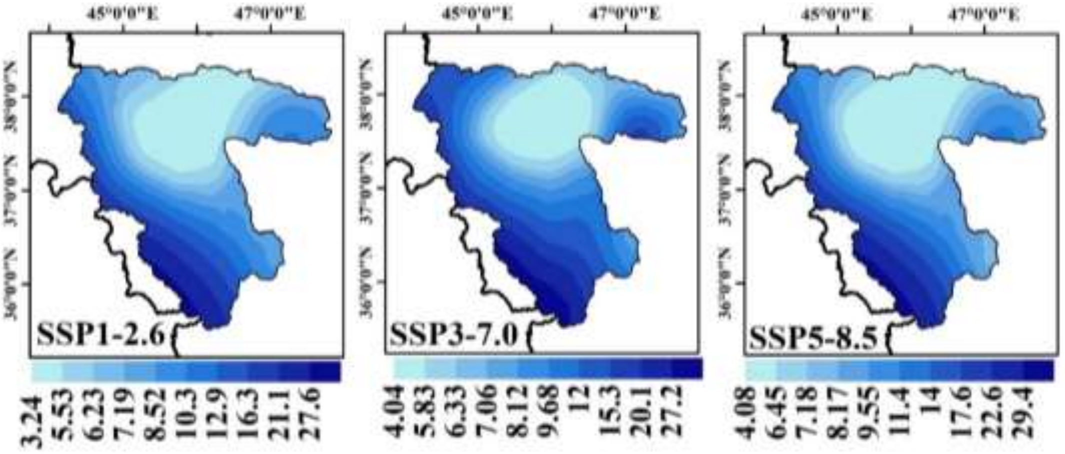
پیش‌نگری تغییرات آینده روزهای همراه با بارش سنگین در حوضه دریاچه ارومیه نشان داده است که روزهای بارشی با این آستانه در غالب مناطق حوضه دریاچه ارومیه افزایش خواهد داشت. پیش‌نگری متوسط روزهای همراه با بارش سنگین برای دوره آینده نزدیک (۲۰۵۰–۲۰۲۶) تحت سناریوهای سه‌گانه SSP نشان داد بارش‌های سنگین نسبت به دوره تاریخی افزایش خواهند داشت. بر این اساس، روزهای همراه با بارش سنگین تحت سناریو SSP1-2.6 افزایش ۲/۲ روزه، تحت سناریو SSP3-7.0 افزایش ۱/۸ روزه و تحت سناریو SSP5-8.5 افزایش حداکثری ۴ روزه را تجربه خواهد کرد. به جهت پراکنش فضایی در دوره آینده نزدیک (۲۰۵۰–۲۰۲۶) تغییرات چشمگیری را نسبت به دوره تاریخی (۲۰۱۴–۱۹۹۰) شاهد نخواهیم بود (شکل ۵).

همانطور که گفته شد روزهای همراه با بارش سنگین افزایشی خواهد بود و این مقدار افزایشی یک تهدید جدی برای ریسک سیلاب و مدیریت آب‌های سطحی محسوب می‌شود. همچنین علاوه بر افزایش بارش‌های سنگین به جهت مکانی نیز بر وسعت مناطقی با بارش‌های سنگین بخصوص در مناطق غربی و جنوب غربی حوضه دریاچه ارومیه افزوده خواهد شد. رخداد روزهای همراه با بارش سنگین از جمله شایع ترین مخاطرات اقلیمی و هیدرولوژیکی در ایران است (Zarrin *et al.*, 2022a). بنابراین، افزایش R10mm و همچنین R20mm نشان می دهد که سیاست‌های سازگاری و تعدیل باید برای کاهش اثرات احتمالی مرتبط با بارش‌های سیل‌آسا در حوضه دریاچه ارومیه مورد توجه قرار گیرد.



شکل ٤- روزهای همراه با بارش سنگین (R10mm) و بارش خیلی سنگین (R20mm) در حوضه دریاچه ارومیه مبتنی بر برونداد CMIP6-MME طی دوره تاریخی (۲۰۱٤–۱۹۹۰)

Figure 4- Number of heavy precipitation days (R10mm) and very heavy precipitation days (R20mm) in Urmia Lake Basin based on CMIP6-MME during the historical period (1990-2014)



شکل ۵- روزهای همراه با بارش سنگین (R10mm) در حوضه دریاچه ارومیه مبتنی بر برونداد CMIP6-MME طی دوره آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲٦) تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP3-7.0 و SSP5-8.5

Figure 5- Number of heavy precipitation days (R10mm) in Lake Urmia basin based on CMIP6-MME in near future (2026-2050) under SSP1-2.6, SSP3-7.0 and SSP5-8.5 scenarios

فراوانی وقوع چنین بارش‌هایی در دهه‌های اخیر در بسیاری از مناطق نیمکره شمالی افزایش یافته و خسارات گسترده‌ای را بر جای گذاشته است. در تبیین علت افزایش وقوع این بارش‌ها و ارتباط آن با گرمایش جهانی و تغییر اقلیم مطالعات متعددی انجام شده است. برأساس این مطالعات، واداشت‌های بسیاری در افزایش بارش‌های سنگین و خیلی سنگین نقش دارند که یکی از آن‌ها می‌تواند تغییر فعالیت امواج راسبی در نیمکره شمالی باشد. توضیح بیشتر آن که با گرمایش جهانی ما شاهد پدیده‌ای موسوم به «تقویت شمالگان» در نیمکره شمالی بوده‌ایم. بروز این پدیده حرکت کندتر امواج در تراز بالا را سبب می‌شود که به نوبه خود باعث می‌شود که سامانه‌های مقیاس همدید در عرض‌های جغرافیایی میانی ماندگارتر شوند. یافته‌ها حاکی از آن است که این تغییرات با افزایش فراوانی و شدت رخدادهای فرین اقلیمی مانند خشکسالی، سیل، دوره‌های سرد و امواج گرمایی همراه است (Francis & Vavrus, 2012). اهمیت امواج راسبی در عرض‌های میانی در شکل‌گیری بارش‌های فرین در مناطق مختلفی از جمله آسیای مرکزی نشان داده شده است (Xu *et al*., 2022). با توجه به اینکه این امواج را می‌توان ۱۰ روز قبل از بارش‌ها شناسایی کرد، آشفتگی شناخته شده بر فراز اقیانوس اطلس شمالی ممکن است به عنوان یک پیش‌نشانگر بالقوه برای بارش‌های فرین در شمال‌غربی ایران و به‌طور مشخص حوضه دریاچه ارومیه عمل کند.

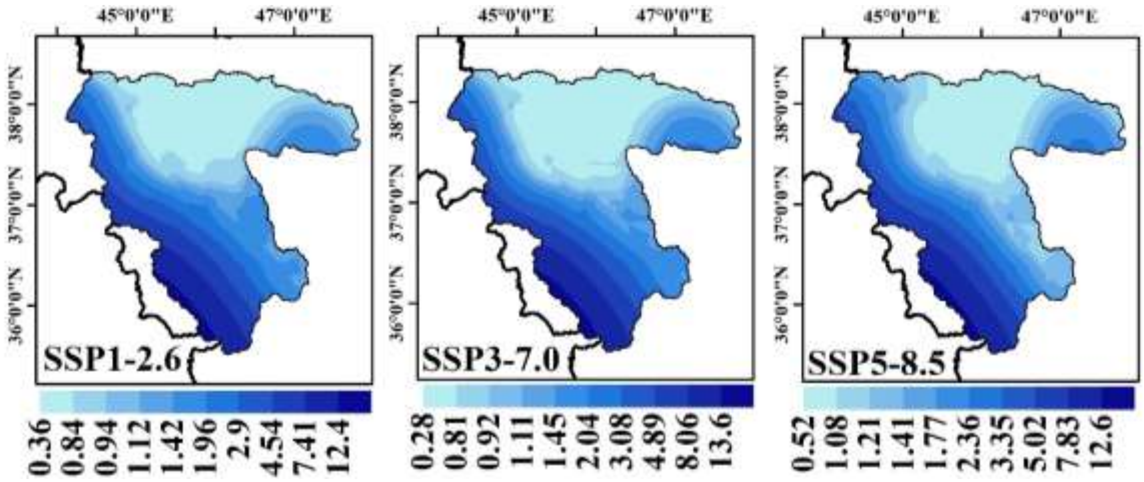
تعداد روزهای همراه با بارش خیلی سنگین در ایران طی دهه‌های آتی در حوضه دریاچه ارومیه افزایشی خواهد بود. تغییرات درون سالی تعداد روزهای بارش خیلی سنگین در آینده بین ۰/۲۸ تا ۱۳/۶۰ روز در نوسان است. این در حالی است که در دوره تاریخی روزهای همراه با بارش خیلی سنگین دامنه بین ۰/۲ تا ۱۱/۵ روزه را نشان دادند. همانطور که پیداست هم در مقدار کمینه و هم برای مقدار بیشینه روزهای همراه با بارش خیلی سنگین در حوضه دریاچه ارومیه در آینده افزایشی خواهد بود. بیشینه تغییرات افزایشی نیز معطوف به دو منطقه جنوب‌غربی و شمال‌غربی حوضه خواهد بود. مقدار افزایش روزهای همراه با بارش خیلی سنگین برای حوضه تحت سناریو SSP3-7.0 بیش‌تر از SSP5-8.5 است و از آنجاییکه حوضه دریاچه ارومیه یکی از مهم‌ترین حوضه های ایران به جهت وضعیت بحرانی فعلی دریاچه ارومیه است این افزایش در تعداد روزهای همراه با بارش سنگین و خیلی سنگین یک تهدید جدی برای مدیریت آب‌های ورودی و خروجی این دریاچه محسوب می‌شود. در همین راستا طبری (Tabari, 2020) نشان داد رخدادهای فرین بارش و سیل در تمامی مناطق اقلیمی جهان با افزایش آب در دسترس جو در نتیجه گرمایش جهانی افزایش می‌یابد.

کمینه افزایش روزهای همراه با بارش خیلی سنگین در مناطق شمالی تا مرکزی دیده می‌شود (شکل ۷). کانون اصلی روزهای همراه با بارش خیلی سنگین حوضه دریاچه ارومیه منطقه جنوب‌غربی این حوضه است. زیاد بودن روزهای همراه با بارش خیلی سنگین در این منطقه با توجه به فاصله از منابع رطوبتی شاید کمی دور از انتظار باشد اما باید توجه داشت که در مقیاس محلی، تأثیر گرمایش جهانی بر فراوانی روزهای همراه با بارش سنگین بستگی به این دارد که کدام الگوها در مقیاس همدید باعث بارش سنگین در مناطق مختلف جغرافیایی می‌شوند.

بررسی میانگین دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۰) دو شاخص شدت بارش RX1day و SDII براساس CMIP6-MME نشان می‌دهد که مدل همادی CMIP6 مقدار شاخص RX1day را در حوضه دریاچه ارومیه بین حداقل ۱۶/۳ میلی‌متر تا حداکثر ۶۳/۳ میلی‌متر برآورد کرده است. بیشینه تغییرات این شاخص در مناطق جنوبی حوضه بخصوص در مرز با کشور عراق است. پراکندگی فضایی شاخص SDII نیز مشابه

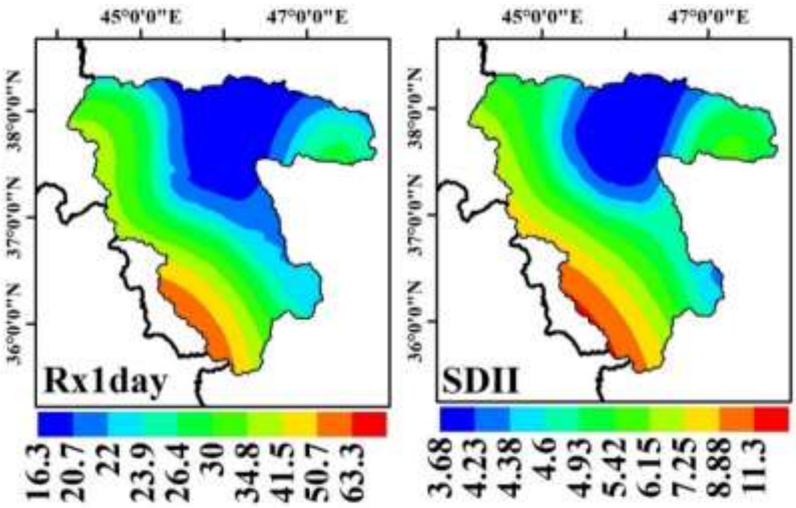
با RX1day در حوضه دریاچه ارومیه است (شکل ۷). شدت بارش سالانه بر اساس این شاخص در این منطقه ۱۱/۳ میلی‌متر در روز است. کمینه هر دو شاخص مرتبط با شدت بارش یعنی RX1day و SDII در مناطق مرکزی و بخش‌های شمال حوضه قرار دارد. البته قابل ذکر است که مناطق شمال‌غربی و شمال‌شرقی حوضه کمینه شدت بارش روزانه و بیشینه بارش یک روزه را ندارند.

تغییرات شدت بارش در ایران تحت شرایط تغییر اقلیم آینده مقادیر بیشینه بارش یک روزه و شدت بارش روزانه برای آینده نزدیک تحت سناریوهای سه گانه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد دو شاخص فرین بارش SDII و Rx1day طی دوره آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۶) افزایش خواهند داشت. مقدار افزایش شاخص SDII به نسبت شاخص RX1day بیش‌تر است و همچنین در سناریو خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) از افزایش بیش‌تری برخوردار است.



شکل ٦- روزهای همراه با بارش خیلی سنگین (R20mm) در حوضه دریاچه ارومیه مبتنی بر برونداد CMIP6-MME طی دوره آینده نزدیک (۲۰۲٦-۲۰۵۰) تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP3-7.0 و SSP5-8.5

Figure 6- heavy precipitation days (R20mm) in Lake Urmia basin based on CMIP6-MME in near future (2026-2050) under SSP1-2.6, SSP3-7.0 and SSP5-8.5 scenarios



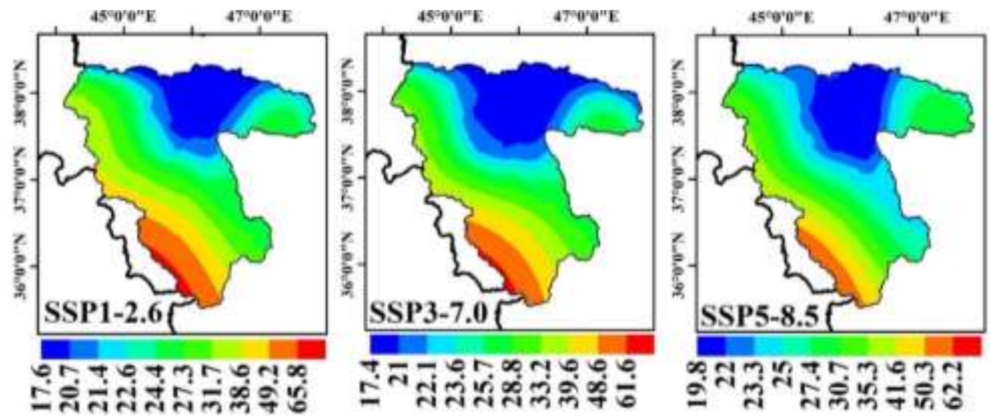
شکل ۷- بیشینه بارش یک روزه (Rx1day) و شدت بارش روزانه (SDII) در حوضه دریاچه ارومیه مبتنی بر برونداد CMIP6-MME طی دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱٤)

Figure 7- Max 1-day precipitation (Rx1day) and Simple daily precipitation index (SDII) in Urmia Lake Basin based on CMIP6-MME during the historical period (1990-2014)

بیشینه متوسط بی‌هنجاری RX1day با ۲/۵ میلی‌متر و بیشینه بی هنجاری نیز حدود ۱ میلی‌متر در روز (۰/۹ میلی‌متر) آمده است. کمینه هر دو شاخص SDII و RX1day در مناطق نیمه استپی و مناطق شمالی حوضه است، بطوری‌که کمینه شاخص Rx1day با مقدار ۱۷/۴ میلی‌تر تحت سناریو SSP3-7.0 و کمینه شاخص SDII با ۳/۸۸ میلی-متر در روز تحت سناریو SSP1-2.6 به‌دست آمده است. از طرف دیگر بیشینه هر دو این شاخص‌ها در پهنه‌های کوهستانی و مرتفع حوضه در مناطق شرقی و غربی حوضه قرار دارد. به‌عبارتی در پهنه‌های کوهستانی سردسیر حوضه دریاچه ارومیه بی‌هنجاری شدت بارش بیش‌تر از پهنه اقلیمی نیمه استپی است و بیش‌تر دستخوش تغییر می شود. اثرات ترمودینامیکی پهنه‌های کوهستانی، دسترسی رطوبت جو را تغییر داده که در بیشتر مواقع منجر به افزایش بارش‌های فرین و بخصوص شدت بارش خواهد شد (Zhang *et al*., 2021). این اثرات تغییرات بارش‌های فرین را به شدت وابسته به منطقه می‌کند که در حوضه دریاچه ارومیه نیز این تغییرپذیری مشاهده شد.

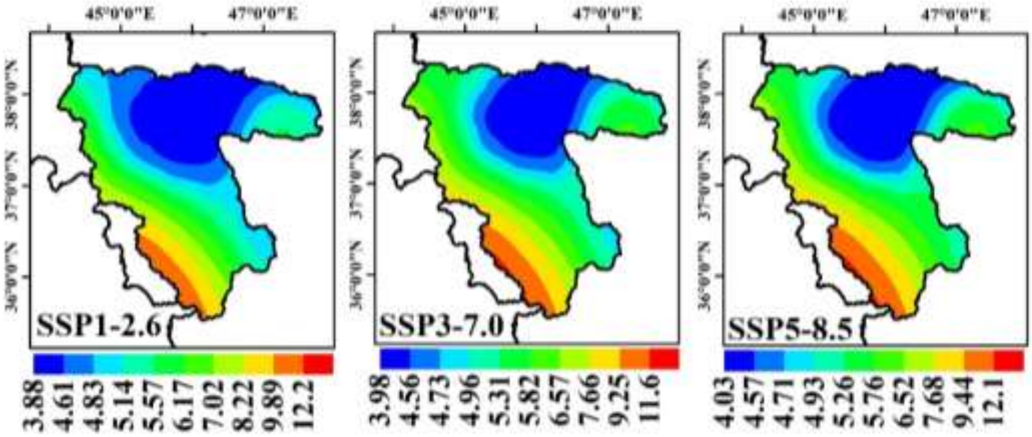
شدت بارش در حوضه دریاچه ارومیه افزایش قابل توجهی را در آینده نزدیک نشان داده است که یک تهدید جدی برای مدیریت منابع آب‌های سطحی است و به نوعی می‌توان اذعان داشت که در پهنه‌هایی که بی‌هنجاری شدت بارش در آن افزایش زیادی دارد مناطق با خطر بالای احتمال وقوع سیل هستند. نتیجه به دست آمده از بررسی شدت بارش در حوضه دریاچه ارومیه بسیار مهم است؛ چرا که در شرایط تغییر اقلیم بیش از مقدار متوسط بارش، شدت آن تغییر بیش‌تری خواهد داشت. تشدید بارش‌های فرین به گرمایش جهانی نسبت داده می‌شود و پژوهش‌های مختلفی همانطور که برای حوضه دریاچه ارومیه نیز نشان داده شد، پیش‌بینی کرده‌اند شدت بارش در آینده در سطح جهانی افزایش می‌یابد (Zeder & Fischer, 2020). روند افزایشی شدت بارش تحت شرایط تغییر اقلیم همانطور که پیش‌تر نیز گفته شد به دلیل ظرفیت رطوبتی بیشتر در جو گرم‌تر است. بطور کلی شدت بارش روزانه تقریباً از رابطه کلاسیوس-کلاپیرون (CC) پیروی می کند که با افزایش هر یک درجه سلسیوس افزایش دما شدت بارش تقریباً ۷٪ افزایش می‌یابد (Trenberth, 2011; Fowler *et al*., 2020). با توجه به این نکته که بارش‌های فرین در شمال‌غرب کشور عمدتاً در فصل بهار به وقوع می پیوندد (Masoudian, 2005; Khorshiddoust *et al*., 2016; Azarm *et al*., 2019; Asadi Rahim-Begi *et al*., 2022)، بنابراین، انتظار می‌رود در دهه‌های آینده بر مقدار بارش‌های فرین بهاره در شمال‌غرب کشور افزوده شود. در همین راستا، به نظر می‌رسد سهم بارش‌های همرفتی نیز در این منطقه در چشم‌انداز آینده افزایش یابد. چرا که بخش قابل توجهی از بارش‌های فرین بهاره در شمال غرب ایران از سازوکار همرفتی بهره می‌برند (Khorshiddoust *et al*., 2016; Azarm *et al*., 2019).

بطور کلی براساس نتایج چهار شاخص فرین R10mm، R20mm، SDII و RX1day انتظار می‌رود که به‌دلیل افزایش آهنگ گرمایش جهانی (IPCC, 2021) الگوهای زمانی-مکانی بارش در حوضه دریاچه ارومیه بی‌نظم‌تر شوند که بر این اساس شدت بارش در حوضه دریاچه ارومیه افزایشی‌تر می‌شود.



شکل ۸- بیشینه بارش یک روزه (Rx1day) در حوضه دریاچه ارومیه مبتنی بر برونداد CMIP6-MME طی دوره آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۶) تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP3-7.0 و SSP5-8.5

Figure 8- Max 1-day precipitation (Rx1day) in Lake Urmia basin based on CMIP6-MME in near future (2026-2050) under SSP1-2.6, SSP3-7.0 and SSP5-8.5 scenarios



شکل ۹- شدت بارش روزانه (SDII) در حوضه دریاچه ارومیه مبتنی بر برونداد CMIP6-MME طی دوره آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۶) تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP3-7.0 و SSP5-8.5

Figure 9- Simple daily precipitation index (SDII) in Lake Urmia basin based on CMIP6-MME in near future (2026-2050) under SSP1-2.6, SSP3-7.0 and SSP5-8.5 scenarios

نتیجه‌گیری

فرین‌های اقلیمی یکی از جدی‌ترین مخاطرات طبیعی هستند که افزایش آن‌ها تحت شرایط تغییر اقلیم پیامدهای بسیاری را به دنبال داشته است. بر این اساس این پژوهش به پیش‌نگری اقلیمی بارش‌های فرین حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از مدل‌های CMIP6 پرداخته است. نتایج اصلی این پژوهش به شرح زیر است:

بررسی درستی مدل‌های منفرد CMIP6 و مدل همادی تولید شده با روش BMA نشان داد که مدل‌های CMIP6 برای بارش در هشت ایستگاه مورد بررسی در حوضه دریاچه ارومیه طی دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۰) دارای کم برآوردی هستند. مدل همادی CMIP6-MME کارایی بارش را به شکل قابل توجهی افزایش داد. کارایی بالاتر مدل همادی نسبت به مدل‌های منفرد CMIP6 پیش تر برای ایران (Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2021) و حوضه دریاچه ارومیه (Zarrin *et al.*, 2022b) مورد تایید قرار گرفته است. همچنین کارایی بالاتر مدل همادی نسبت به مدل‌های منفرد در مناطق مختلفی همانند دشت‌های شمال چین (Bai *et al.*, 2020) اوراسیا (Zhao *et al.*, 2021) و هند (Dey *et al.*, 2022) تأیید شده است. بدین ترتیب نتایج پژوهش حاضر مجددا یافته‌های پیشین را مبنی بر کارایی بالاتر مدل‌های همادی در پیش نگری متغیرهای اقلیمی در مقیاس منطقه‌ای در مقایسه با مدل‌های منفرد مورد تأیید قرار داده است.

نتایج بررسی روزهای همراه با بارش سنگین و خیلی سنگین تا میانه قرن بیست و یکم نشان داد که دو شاخص R10mm و R20mm در بیش‌تر مناطق حوضه دریاچه ارومیه افزایش می‌یابند. مقدار افزایش روزهای همراه بارش سنگین و خیلی سنگین در آینده تحت سناریو SSP5-8.5 بیش‌تر از دو سناریو دیگر خواهد بود. افزایش این بارش‌ها تحت شرایط تغییر اقلیم در شمال شرق ایالات متحده آمریکا (Guilbert *et al.*, 2015)، اندونزی (Tangang *et al.*, 2017) و آسیای مرکزی (Dike *et al.*, 2020) نیز نشان داده شده است.

پژوهش‌های مختلفی همچون فیشر و ناتی (Fischer and Knutti, 2015)، پنگالارو و همکاران (Pangaluru *et al.*, 2018) و فولر و همکاران (Fowler *et al.*, 2020) افزایش روزهای همراه با بارش سنگین و خیلی سنگین و بطور کلی فرین‌های بارشی را به فعالیت‌های انسانی و غلظت‌های بالاتر گازهای گلخانه‌ای (GHG) نسبت داده‌اند که منجر به تغییرات قابل توجهی در شدت بارش و افزایش بارش‌های سنگین و خیلی سنگین می‌شود که این تحقیق نتایج پیشین را تأیید می‌کند. به طور دقیق‌تر، براساس تئوری‌پردازی‌های سال‌های اخیر، در بطن گرمایش جهانی، ظهور پدیده «تقویت شمالگان» شدت و فراوانی وقوع فرین‌های جوی و اقلیمی را در نیمکره شمالی سرعت بخشیده است (Francis & Vavrus, 2012; 2015; Cohen *et al.*, 2014; 2020; Screen & Simmonds, 2014; Overland *et al.*, 2021). در چارچوب تئوری یادشده، همان‌طوری‌که افروزش (Afrouzeh, 2018) نیز نشان داد، افزایش فرین‌های اقلیمی (از جمله شدت و فراوانی وقوع بارش‌های سنگین و خیلی سنگین) در خاورمیانه و ایران قابل تبیین بوده و می‌توان آن را به تغییر رفتار بزرگ مقیاس گردش جو در نیمکره شمالی بویژه تغییر فعالیت امواج راسبی نسبت داد. از سویی، عدم آشکارسازی و لحاظ ننمودن پدیده‌هایی چون تقویت شمالگان وگرمایش سریع و ناگهانی بوقوع پیوسته در محدوده قطب شمال در طی دو دهه اخیر در مدل‌های اقلیمی آینده‌نگر این دغدغه را ایجاد خواهد نمود که لحاظ ننمودن پدیده تقویت شمالگان و پسخورهای اقلیمی ناشی از آن در سامانه اقلیمی، می تواند موجب کم-برآوردی و عدم قطعیت بالای مدل‌های CMIP6 تحت سناریوهای

موجود در برآورد وضعیت اقلیم آینده گردد (Screen *et al*., 2018). به طوری‌که در دهه‌های آینده، فرین‌های جوی و اقلیمی بسیار بیشتر، گسترده‌تر و شدیدتر از چشم انداز ارائه شده در مدل‌های کنونی پیش نگری اقلیمی بوقوع بپیوندند.

تحلیل سناریوهای مختلف SSP با مدل CMIP6-MME در این مطالعه نشان داد که در بیشتر مناطق حوضه دریاچه ارومیه بخصوص در مناطق شمالی و غربی روزهای همراه با بارش سنگین و خیلی سنگین روند افزایش خواهد داشت و روزهایی با بارش سنگین و خیلی سنگین سهم بیش‌تری را به نسبت روزهای بارشی معمول در آینده خواهند داشت. این نتیجه در افزایش روزهای همراه با بارش سنگین و خیلی سنگین ایران را که زرین و همکاران (Zarrin *et al*., 2022a) گزارش کرده‌اند، تأیید می‌کند.

افزایش شدت بارش در طول قرن بیست و یکم بخشی از پاسخ گسترده سامانه‌های بارشی به پدیده گرمایش جهانی است که پیش‌تر در گزارش ششم هیات بین دولتی تغییر اقلیم نیز بر آن تاکید شده است (IPCC, 2021). افزایش قابل توجه شدت بارش در حوضه دریاچه ارومیه می‌تواند پیامدهایی از قبیل سیل داشته باشد. پیش‌نگری شدت بارش در حوضه دریاچه ارومیه طی دوره آینده نزدیک نشان از افزایش این متغیر تحت رابطه کلاسیوس-کلاپیرون (CC) (Trenberth, 2011) را تا میانه قرن بیست و یکم دارد. علاوه بر این، افزایش بیشتر در شدت بارش تحت سناریوی خیلی بدبینانه SSP5-8.5 پیش‌نگری شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده که به نوعی برجسته‌ترین نتیجه بدست آمده در این تحقیق است؛ انتظار می‌رود شدت بارش طی دهه های آتی در حوضه دریاچه ارومیه افزایش پیدا کند و این افزایش برای مناطق غربی و شمالی بیش‌تر از سایر مناطق حوضه است که می تواند به‌طور بالقوه خطر بارش‌های سیل‌آسا را در حوضه دریاچه ارومیه به‌طور چشمگیری افزایش دهد. همچنین نشان داده شده است که افزایش شدت بارش‌های محلی به بازخوردهای ابر همرفتی مربوط است که می‌تواند تا حدی تغییرات شدت بارش را در سطح حوضه توضیح دهد. اما باید توجه داشت ارتباط بازخوردهای ابر همرفتی با تغییر اقلیم به دلیل تغییرات چینش دما و گردش بزرگ مقیاس جو دارای عدم قطعیت است (Fowler *et al*., 2020) و نیازمند پژوهش‌های بیش‌تر و مستقلی در این زمینه برای حوضه دریاچه ارومیه و سایر مناطق کشور است.

منابع

1. Afrouzeh, M. (2018). Analysis of the activity of Rossby waves in the Northern Hemisphere and its relationship with the temporal and spatial variability of precipitation in the Middle East. M.S Thesis in climatology, Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. (In Persian)
2. Alavinia, S.H., & Zarei, M. (2021). Analysis of spatial changes of extreme precipitation and temperature in Iran over a 50-year period. *International Journal of Climatology*, *41*, E2269-E2289. https://doi.org/10.1002/joc.6845
3. Alexander, L.V., & Arblaster, J.M. (2017). Historical and projected trends in temperature and precipitation extremes in Australia in observations and CMIP5. *Weather and Climate Extremes*, *15*, 34-56. https://doi.org/10.1016/j.wace.2017.02.001.
4. Asadi Rahim-Begi, N., Zarrin, A., Modfidi, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2022). Seasonal Distribution Analysis of Extreme Precipitation in Iran using AgERA5 dataset. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *52*(11), 2723-2737. (In Persian). https://doi.org/10.22059/ijswr.2021.333263.669118.
5. Azarm, K., Mofidi, A., & Khorshiddoust, A.M. (2019). Investigation of the mesoscale mehcanisms for the occurrence of convective precipitation in the North West of Iran. *Journal of the Erath and Space Physics*, *45*(3), 553-573. (In Persian). https://doi.org/10.22059/JESPHYS.2019.261456.1007023.
6. Bai, H., Xiao, D., Wang, B., Liu, D.L., Feng, P., & Tang, J. (2021). Multi-model ensemble of CMIP6 projections for future extreme climate stress on wheat in the North China plain. *International Journal of Climatology*, *41*, E171-E186. https://doi.org/10.1002/joc.6674.
7. Chamanehfar, S., Mousavi Baygi, M., Babaeian, I., & Modaresi, F. (2022). Future projection for extreme indices of precipitation and temperature over the period 2026-2100 based on the output of CMIP6 models (Case study: Mashhad). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *16*(5), 963-976. (In Persian). https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087942.1401.16.5.7.2.
8. Cohen, J., Screen, J.A., Furtado, J.C., Barlow, M., Whittleston, D., & Comou, D. (2014). Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nature Geoscience*, *7*, 627–637. https://doi.org/10.1038/ngeo2234
9. Cohen, J., Zhang, X., Francis, J., Jung, T., Kwok, R., Overland, J., & Yoon, J. (2020). Divergent consensuses on Arctic amplification influence on mid-latitude severe winter weather. *Nature Climate Change*, *10*(1), 20-29. https://doi.org/10.1038/s41558-019-0662-y
10. Coulibaly, P., Dibike, Y.B., & Anctil, F. (2005). Downscaling precipitation and temperature with temporal neural networks. *Journal of Hydrometeorology*, *6*(4), 483-496. https://doi.org/10.1175/JHM409.1
11. Deng, X., Perkins-Kirkpatrick, S.E., Lewis, S.C., & Ritchie, E.A. (2021). Evaluation of extreme temperatures over Australia in the historical simulations of CMIP5 and CMIP6 models. *Earth's Future*, *9*(7), e2020EF001902. https://doi.org/10.1029/2020EF001902

12. Dey, A., Sahoo, D.P., Kumar, R., & Remesan, R. (2022). A multimodel ensemble machine learning approach for CMIP6 climate model projections in an Indian River basin. *International Journal of Climatology*, *42*(16), 9215-9236. https://doi.org/10.1002/joc.7813
13. Dike, V.N., Lin, Z., Fei, K., Langendijk, G.S., & Nath, D. (2022). Evaluation and multimodel projection of seasonal precipitation extremes over central Asia based on CMIP6 simulations. *International Journal of Climatology, 42*(14), 7228-7251. https://doi.org/10.1002/joc.7641
14. Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J., & Taylor, K.E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, *9*(5), 1937-1958. https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016
15. Faye, A., & Akinsanola, A.A. (2022). Evaluation of extreme precipitation indices over West Africa in CMIP6 models. *Climate Dynamics*, *58*(3-4), 925-939. https://doi.org/10.1007/s00382-021-05942-2
16. Fischer, E.M., & Knutti, R. (2015). Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes. *Nature Climate Change*, *5*(6), 560-564. http://dx.doi.org/10.1038/NCLIMATE2617.
17. Fowler, H.J., Lenderink, G., Prein, A.F., Westra, S., Allan, R.P., Ban, N., & Zhang, X. (2021). Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes. *Nature Reviews Earth & Environment*, *2*(2), 107-122. https://doi.org/10.1038/s43017-020-00128-6.
18. Francis, J.A., & Vavrus, S.J. (2012). Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes. *Geophysical Research Letters*, *39*(6), L06801.https://doi.org/10.1029/2012GL051000
19. Francis, J.A., & Vavrus, S.J. (2015). Evidence for a wavier jet stream in response to rapid Arctic warming. *Environmental Research Letters*, *10*, 14005. https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/1/014005
20. Goodman, S. J., Blakeslee, R., Christian, H., Koshak, W., Bailey, J., Hall, J., & Gatlin, P. (2005). The North Alabama lightning mapping array: Recent severe storm observations and future prospects. *Atmospheric Research*, *76*(1-4), 423-437. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2004.11.035.
21. Guilbert, J., Betts, A.K., Rizzo, D.M., Beckage, B., & Bomblies, A. (2015). Characterization of increased persistence and intensity of precipitation in the northeastern United States. *Geophysical Research Letters 42*(6), 1888-1893. https://doi.org/10.1002/2015GL063124.
22. Hasemi, M. (2011). *A socio-technical assessment framework for integrated water resources management (IWRM) in Lake Urmia Basin*, Iran (Doctoral dissertation, Newcastle University).
23. IPCC (2014). *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability*. Part A: Global and 248 Sectoral Aspects. In Contribution of working group II to the fifth assessment report of the 249 intergovernmental panel on climate change (pp. 1–1132). Cambridge, UK, New York, NY: Cambridge University Press.
24. IPCC, A. (2013). *Climate change 2013: the physical science basis*. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 1535.
25. IPCC. (2021). Summary for policymakers. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, et al. (Eds.), *Climate change 2021: The physical science basis*. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change (pp. 3–32). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896.001
26. Katiraie-Boroujerdy, P.S., Akbari Asanjan, A., Chavoshian, A., Hsu, K.L., & Sorooshian, S. (2019). Assessment of seven CMIP5 model precipitation extremes over Iran based on a satellite-based climate data set. *International Journal of Climatology*, *39*(8), 3505-3522. https://doi.org/10.1002/joc.6035.
27. Khorshiddoust, A.M., Mofidi, A., Rasouli, A.A., & Azarm, K. (2016). A Synoptic analysis for the occurrence of springtime heavy rainfall in the Northwest of Iran. *Journal of Natural Environmental Hazards*, *5*(8), 53-82. (In Persian)
28. Li, Z., Liu, T., Huang, Y., Peng, J., & Ling, Y. (2022). Evaluation of the CMIP6 precipitation simulations over global land. Earth's Future, 10(8): e2021EF002500. https://doi.org/10.1029/2021EF002500
29. Liu, J., Hertel, T.W., Diffenbaugh, N.S., Delgado, M.S., & Ashfaq, M. (2015). Future property damage from flooding: sensitivities to economy and climate change. *Climatic Change*, *132*, 741-749. https://doi.org/10.1007/s10584-015-1478-z.
30. Malaekeh, S., Safaie, A., Shiva, L., & Tabari, H. (2022). Spatio-temporal variation of hydro-climatic variables and extreme indices over Iran based on reanalysis data. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, *36*(11), 3725-3752. https://doi.org/10.1007/s00477-022-02223-0
31. Masoudian, S.A. (2005). Recognition of precipitation regimes of Iran using cluster analysis. *Geographical Research Quarterly*, *37*(52), 47-59. (In Persian)
32. Meresa, H., Tischbein, B., & Mekonnen, T. (2022). Climate change impact on extreme precipitation and peak flood magnitude and frequency: observations from CMIP6 and hydrological models. *Natural Hazards*, *111*(3), 2649-2679. https://doi.org/10.1007/s11069-021-05152-3
33. Modaresi, F., & Araghi, A. (2023). Projecting future reference evapotranspiration in Iran based on CMIP6 multi-model ensemble. *Theoretical and Applied Climatology*, 1-12. https://doi.org/10.1007/s00704-023-04465-6
34. Nie, Y., & Sun, J. (2022). Moisture sources and transport for extreme precipitation over Henan in July 2021.

Geophysical Research Letters, *49*(4), e2021GL097446. https://doi.org/10.1029/2021GL097446
35. Overland, J.E., Ballinger, T.J., Cohen, J., Francis, J.A., Hanna, E., Jaiser, R., & Zhang, X. (2021). How do intermittency and simultaneous processes obfuscate the Arctic influence on midlatitude winter extreme weather events? *Environmental Research Letters*, *16*(4), 043002. https://doi.org/10.1088/1748-9326/abdb5d
36. Pangaluru, K., Velicogna, I., C Sutterley, T., Mohajerani, Y., Ciraci, E., Sompalli, J., & Saranga, V.B.R. (2018). Estimating changes of temperatures and precipitation extremes in India using the Generalized Extreme Value (GEV) distribution. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 1-33. https://doi.org/10.5194/hess-2018-522
37. Pimonsree, S., Kamworapan, S., Gheewala, S.H., Thongbhakdi, A., & Prueksakorn, K. (2023). Evaluation of CMIP6 GCMs performance to simulate precipitation over Southeast Asia. *Atmospheric Research*, *282*, 106522. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106522
38. Raftery, A.E., Gneiting, T., Balabdaoui, F., & Polakowski, M. (2005). Using Bayesian model averaging to calibrate forecast ensembles. *Monthly Weather Review*, *133*(5), 1155-1174. https://doi.org/10.1175/MWR2906.1
39. Ryan, C., Curley, M., Walsh, S., & Murphy, C. (2022). Long-term trends in extreme precipitation indices in Ireland. *International Journal of Climatology*, *42*(7), 4040-4061. https://doi.org/10.1002/joc.7475
40. Screen, J.A., & Simmonds, I. (2014). Amplified mid-latitude planetary waves favour particular regional weather extremes. *Nature Climate Change*, *4*, 704–709. https://doi.org/10.1038/nclimate2271
41. Screen, J.A., Deser, C., Smith, D.M., Zhang, X., Blackport, R., Kushner, P.J., & Sun, L. (2018). Consistency and discrepancy in the atmospheric response to Arctic sea-ice loss across climate models. *Nature Geoscience*, *11*(3), 155-163. https://doi.org/10.1038/s41561-018-0059-y
42. Seneviratne, S.I., & Hauser, M. (2020). Regional climate sensitivity of climate extremes in CMIP6 versus CMIP5 multimodel ensembles. *Earth's Future*, *8*(9), e2019EF001474. https://doi.org/10.1029/2019EF001474.
43. Sorooshian, S., Duan, Q., & Gupta, V. K. (1993). Calibration of rainfall-runoff models: Application of global optimization to the Sacramento Soil Moisture Accounting Model. *Water Resources Research*, *29*(4), 1185-1194. https://doi.org/10.1029/92WR02617.
44. Tabari, H. (2020). Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. *Scientific Reports*, *10*(1), 1-10. https://doi.org/10.1038/s41598-020-70816-2
45. Tangang, F., Juneng, L., & Aldrian, E. (2017). Observed changes in extreme temperature and precipitation over Indonesia. *International Journal of Climatology*, *37*(4), 1979-1997. https://doi.org/10.1002/joc.4829
46. Thackeray, C.W., Hall, A., Norris, J., & Chen, D. (2022). Constraining the increased frequency of global precipitation extremes under warming. *Nature Climate Change*, *12*(5), 441-448. https://doi.org/10.1038/s41558-022-01329-1
47. Trenberth, K. E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, *47*(1-2), 123-138. https://doi.org/10.3354/cr00953
48. WMO (2020). WMO statement on the state of the global climate in 2019. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnumid=10211
49. Xu, H., Chen, H., & Wang, H. (2022). Future changes in precipitation extremes across China based on CMIP6 models. *International Journal of Climatology*, *42*(1), 635-651. https://doi.org/10.1002/joc.7264
50. Xu, P., Wang, L., & Ming, J. (2022). Central Asian precipitation extremes affected by an intraseasonal planetary wave pattern. *Journal of Climate*, *35*(8), 2603-2616. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0657.1
51. Yazdandoost, F., Moradian, S., Izadi, A., & Aghakouchak, A. (2021). Evaluation of CMIP6 precipitation simulations across different climatic zones: Uncertainty and model intercomparison. *Atmospheric Research*, *250*, 105369. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105369
52. Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2021). Projection of future extreme precipitation in Iran based on CMIP6 multi-model ensemble. *Theoretical and Applied Climatology*, *144*, 643-660. https://doi.org/10.1007/s00704-021-03568-2
53. Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2022a). Spatiotemporal variability, trend, and change-point of precipitation extremes and their contribution to the total precipitation in Iran. *Pure and Applied Geophysics*, *179*(8), 2923-2944. https://doi.org/10.1007/s00024-022-03098-6
54. Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2022b). Evaluation of reanalysis-based, satellite-based, and "bias-correction"-based datasets for capturing extreme precipitation in Iran. *Meteorology and Atmospheric Physics*, *134*(4), 67. https://doi.org/10.1007/s00703-022-00903-8
55. Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2023). Evaluation of CMIP6 models in estimating temperature in Iran with emphasis on equilibrium climate sensitivity (ECS) and transient climate response (TCR). *Iranian Journal of Geophysics*, *17*(1), 39-56. (In Persian). http://doi.org/10.30499/ijg.2022.344862.1430
56. Zarrin, A., Dadashi-Roudbari, A., & Hassani, S. (2022a). Future changes in precipitation extremes over Iran: Insight from a CMIP6 bias-corrected multi-model ensemble. *Pure and Applied Geophysics*, *179*, 441-464. https://doi.org/10.1007/s00024-021-02904-x
57. Zarrin, A., Dadashi-Roudbari, A., & Kadkhoda, E. (2022b). Drought projection in the Urmia Lake basin under SSP Scenarios until the End of the 21st Century. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *53*(7), 1499-1516. (In Persian). http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.343700.669278

58. Zeder, J., & Fischer, E.M. (2020). Observed extreme precipitation trends and scaling in Central Europe. *Weather and Climate Extremes*, *29*, 100266. https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100266
59. Zhang, W., Furtado, K., Wu, P., Zhou, T., Chadwick, R., Marzin, C., & Sexton, D. (2021). Increasing precipitation variability on daily-to-multiyear time scales in a warmer world. *Science Advances*, *7*(31), eabf8021. https://doi.org/10.1126/sciadv.abf8021
60. Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G.C., Jones, P., Tank, A.K., Peterson, T.C., & Zwiers, F.W. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, *2*(6), 851-870. https://doi.org/10.1002/wcc.147
61. Zhao, Y., Qian, C., Zhang, W., He, D., & Qi, Y. (2021). Extreme temperature indices in Eurasia in a CMIP6 multi-model ensemble: Evaluation and projection. *International Journal of Climatology*, *41*(11), 5368-5385. https://doi.org/10.1002/joc.7134